

# 基于形状记忆聚合物复合材料航天航空可变形结构技术研究进展

赵伟<sup>1</sup> 刘立武<sup>1</sup> 孙健<sup>2</sup> 冷劲松<sup>2</sup> 刘彦菊<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学航天科学与力学系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 形状记忆聚合物及其复合材料是一种在相应的外界刺激下可以在临时形状和初始形状之间进行切换的智能材料,具有低密度、低成本、可回复变形大,刺激方式可控等优点,在航天航空领域,如:空间可展开结构、锁紧释放机构、变体等,展现出来了巨大的应用潜力。这些应用大多处于开发阶段,一部分完成了地面功能验证,少部分进行了航天实验。本文首先总结了形状记忆聚合物(SMP)和形状记忆聚合物复合材料(SMPC)的分类,以及恶劣的空间环境因素下SMP的性能变化。随后总结了SMPC的空间可展开结构,包括:铰链、桁架、太阳能电池阵;SMPC的解锁释放结构;SMPC的变体结构以及基于4D打印的SMPC可展开结构的潜在应用。最后,对形状记忆材料和结构的发展前景进行了展望。

**关键词** 形状记忆聚合物,复合材料,可变形结构,航天航空

中图分类号:V45

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.008

## Progress of Aerospace Deformable Structures Based on Shape Memory Polymer Composites

ZHAO Wei<sup>1</sup> LIU Liwu<sup>1</sup> SUN Jian<sup>2</sup> LENG Jinsong<sup>2</sup> LIU Yanju<sup>1</sup>

(1 Department of Astronautical Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(2 Centre for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Shape memory polymer and its composites are a type of intelligent materials that can convert between the temporary shape and original shape under corresponding external stimuli. Shape memory polymer and its composites have many advantages, such as low density, low cost, large recoverable deformation and controllable stimulus mode, etc., and have shown great application potential in the aerospace field, including space deployable structure, releasing mechanism, morphing aircraft, etc. Most of these applications are in the development stage, some of which has already completed the functional verification on the ground, and a few of which have been tested in space. This work first summarized the classification of SMP and SMPC, as well as the performance change of SMP under adverse spatial environment factors. Subsequently, space deployable structure of SMPC are summarized, including hinge, truss, solar array, SMPC releasing device, morphing structures and 4D printed deployable structures. Finally, the article looks forward to the development trend of materials and structures.

**Key words** Shape memory, Composite, Deformable Structure, Aerospace

### 0 引言

自20世纪80年代发现形状记忆聚合物(SMP)以来,国际上对该聚合物形状记忆效应(SME)的研究兴趣迅速增长。SMP是一种具有刺激响应能力的智能材料,在相应的外部刺激的作用下可以产生很大

的可回复变形<sup>[1-3]</sup>。在玻璃化转变温度( $T_g$ )以下SMP相对较硬,模量较大,而在 $T_g$ 以上,SMP模量较小,相对较软<sup>[4-5]</sup>。在 $T_g$ 以上通过施加外力,SMP可以被赋形成任意的临时形状,当冷却并去除这种外力时,它们的临时形状可以长时间保持。然而,当再次加热

收稿日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金(12072094,11632005)

第一作者简介:赵伟,1991年出生,博士研究生,研究方向为智能材料和结构。E-mail:chevalier\_zw@163.com

通信作者:刘彦菊,1972年出生,教授,博士生导师,主要从事智能材料和结构的研究工作。E-mail:yj\_liu@hit.edu.cn

后,它们会由临时形状回复到初始形状。

SMP不仅可以感应热刺激,还可以响应包括磁<sup>[6-8]</sup>、光<sup>[9-10]</sup>、溶液<sup>[11]</sup>等的刺激。SMP存在许多潜在的优势,例如:与形状记忆合金(SMA)和形状记忆陶瓷相比具有更大的可回复变形、密度低、性能可调( $T_g$ 、模量、生物降解性等),最重要的是成本低。基于上述优点,SMP、形状记忆聚合物复合材料(SMPC)以及具备更多功能特性的新型SMP相继被开发出来。例如,结合纳米技术,各种SMP材料被开发出来以满足生物医学、传感器、致动器或纺织品的特定需求。此外,大多数传统的可展开装置的结构均比较复杂,包含大量的连杆、铰链和电机,成本高昂,控制复杂。而SMP和SMPC集传感、驱动、功能于一体,以其轻质、低廉的优势,在航天航空领域逐渐发挥作用。目前,SMP和SMPC已经广泛应用于空间可展开结构,包括铰链、桁架、可展开电池阵以及可变翼的变形蒙皮等。本文对SMP、SMPC及其在航天

航空可变形结构的应用进行系统、全面的概述。

## 1 典型形状记忆聚合物材料简介

与SMA相比,SMP具有质量轻、价格低廉、密度低、可塑性好、变形能力强、可降解性好以及 $T_g$ 可调等优势。据文献[2]报道,SMP的应变可高达600%,相比之下,SMA、形状记忆陶瓷和玻璃的最大可回复应变分别小于10%、1%和0.1%。SMP与SMA相比,驱动力较小,但是其可回复应变较大,然而其低变形刚度和低回复应力在一定程度上限制了该类材料的应用<sup>[12-13]</sup>。为了克服这些缺陷,SMPC被开发出来并在实际应用中得到了发展。SMPC具有更高的强度和模量,通过添加某些填料可以赋予其相应的功能。另外,一些多功能形状记忆材料,包括功能梯度SMP、双向SMP、自愈合SMP和SMP泡沫材料等也相继被开发出来。表1列出了SMA、SMP和SMPC的主要性能。

表1 SMA、SMP与SMPC的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of SMA, SMP and SMPC

材料	$T_g / ^\circ\text{C}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	变形率/%	变形力/MPa	回复力/MPa	回复速率/s	$>T_g$ E/MPa	$<T_g$ E/MPa	$\nu$
SMA	-10~100	6~8	<8-12	50~200	150~300	<1	~100000	28~41	0.33
SMP	-10~320	0.9~1.2	600	1~3	1~3	1~1000	2~10	~2500	0.40
SMPC	-10~320	0.9~1.8	1.5	-	-	1~1000	-	$E_1 \sim 36000$ $E_2 \sim 2800$	0.40

表2 不同增强相对SMP性能的影响

Tab. 2 Influence of different enhancement on the properties of SMP

填充相	增强相	填充比例/%	形状固定率/%	形状回复率/%	模量/MPa	回复应力	参考文献
	碳纳米管+PU	1~5	70	~100		增加了50%	[14]
	纳米碳粉末+苯乙烯	10		75~80	2 091.27 (20 °C) 6.44 (100 °C)	-	[15]
碳材料	炭黑+PLA+TPU	0~8	90	59~85.9	提高一倍以上	-	[16]
	多壁碳纳米管+聚氨酯	3.3	95	~95	提高一倍以上	为聚合物的2倍	[17-18]
	碳纤维+聚酰亚胺	5	81.3	86.1	纯聚合物的1.81倍(7 480)	纯SMP无法检测,复合材料为40.1 MPa	[19]
金属	镍锌铁颗粒+PU	1~20	无明显变化	无明显变化	$T < T_g$ , 增加56 $T > T_g$ , 增加24	-	[20]
纳米黏土颗粒	PU+黏土颗粒	1~5	93	~85	5.2~12.2 MPa	增加20% (3.8~4.8)	[21]
	热塑性PU	10~30		~80	$T < T_g$ : ~1 000 ~ 2 000 $T > T_g$ : ~1 ~ 20	-	[22]
玻璃纤维	短玻璃纤维+苯乙烯共聚物	<2.0		~100		玻璃纤维为2.0 wt.%时增加到接近两倍	[23]
	玻璃纤维布+环氧	38	~100	99	弯曲模量提高两个数量级(3 649 MPa对比32 MPa)		[24]
陶瓷	环氧+SiC颗粒	20	~100	100	SiC颗粒为20%(w)时增加到1.7倍		[25-27]

根据增强材料的类型,一般可分为颗粒增强SMPC和纤维增强SMPC。颗粒增强SMPC,其增强相为镍粉、炭黑、碳纳米管和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 纳米颗粒等,多用于

功能材料。纤维增强SMPC,其增强相包括碳纤维、玻璃纤维和凯夫拉尔纤维等,由于其良好的力学性能,通常被用作结构材料。对SMPC的研究表明,

SMPC具有较高的强度、较大的回复力和较高的阻尼等特点,已被广泛应用于纺织、微电子、生物医学、航天航空等领域。表2概述了不同增强相对SMP性能的影响。

基于不同的分子交联结构,SMP/SMPC可分为热塑性和热固性两种类型,而航天航空用的SMP应该具有高模量,较高的 $T_g$ 和环境耐久性。表3列举了常见的航天航空用SMP以及相应的研究单位。

表3 常见的航天航空用SMP材料  
Tab. 3 Common SMP materials for aerospace applications

单位	SMP基体	$T_g/^\circ\text{C}$
SMP Technologies Inc.	聚氨酯 <sup>[28-29]</sup>	-40~90
Lubrizol Advanced Materials	脂肪族聚氨酯 <sup>[30]</sup>	74
CTD公司	氰酸酯 <sup>[31]</sup>	135~230
	环氧 <sup>[32]</sup>	105
	环氧 <sup>[33]</sup>	79.3, 71
ILC Dover, Inc.	氰酸酯 <sup>[34]</sup>	155, 164, 170
	聚氨酯 <sup>[35]</sup>	55, 75
3M公司	环氧 <sup>[36]</sup>	106
	环氧 <sup>[37]</sup>	37~96
哈尔滨工业大学	氰酸酯 <sup>[38]</sup>	156.9~256.9
	聚酰亚胺 <sup>[39]</sup>	321~323

航天航空用的材料需要满足一系列的空间恶劣环境的考验,如高真空、热循环、紫外线辐射、原子氧、等离子体环境(离子和电子)、空间碎片等都有可能引起材料的退化,诱发元件或结构的损伤,降低系统的可靠性,甚至缩短航天器的使用寿命。表4列举了SMP在真空环境中的性能变化。此外,哈尔滨工业大学智能材料和结构研究团队对拥有自主知识产权的航天航空用SMP-CRIV<sup>[41]</sup>和SMCTPI<sup>[42]</sup>材料进行了高真空、热循环、紫外线辐射、原子氧等一系列测试。在真空度为 $5.4 \times 10^{-4}$  Pa的条件下对SMCTPI<sup>[43]</sup>进行了热循环实验,其温度变化范围为-170 ~ +170  $^\circ\text{C}$ ,循环次数分别为0、10、30和50次。傅里叶变换红外(FTIR)光谱实验表明,该材料经热循环后官能团没有发生变化,形状记忆循环实验结果表明,形状固定性和回复率没有显著改变。对SMP-CRIV<sup>[41]</sup>和SMCTPI<sup>[42]</sup>进行了紫外辐照实验,实验结果表明经辐照后,材料表面颜色变暗、透明度降低;SMCTPI的 $T_g$ 不变,SMP-CRIV在3 000等效太阳小时的辐照条件下 $T_g$ 降低7  $^\circ\text{C}$ ;SMCTPI的抗拉伸强度和伸长率在辐照600 h后分别下降了40.5%和41.79%。然而,紫外辐射未改变材料的化学键类型,且形状记忆性能保持稳定。在辐照能为5 eV、辐照通量 $>2 \times 10^{15}$  AO  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的条件下,对SMPEP<sup>[42]</sup>分别进行了33、66和100 h下的空间辐照实验,结果表

明材料的 $T_g$ 升高3  $^\circ\text{C}$ ,力学性能随辐射剂量呈下降趋势。在辐照能为5 eV、辐照通量 $>5 \times 10^{15}$  AO  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的条件下,对SMCTPI<sup>[43]</sup>分别进行了相同辐照时长的实验,结果表明该材料的 $T_g$ 下降1.6  $^\circ\text{C}$ ,但力学性能相对稳定。但是,实验结果均表明两种材料的表面粗糙度均随着AO辐射剂量的增加而增大。

表4 真空环境下SMP的性能变化  
Tab. 4 SMP performance under vacuum environment

材料	$T_g/^\circ\text{C}$	质量损失/%	可凝结挥发物/%
Tembo <sup>®</sup> DP5.1 <sup>[40]</sup>	71	0.87	<0.01
Tembo <sup>®</sup> 5XQ <sup>[40]</sup>	77	0.90	0.03
Tembo <sup>®</sup> BG1.3 <sup>[40]</sup>	164	0.32	0.03
SMP-CRIV <sup>[41]</sup>	205	1.04	0.01

## 2 空间展开结构和锁紧释放机构

### 2.1 空间展开结构

目前,SMP/SMPC在航天航空领域的应用已经得到了广泛的研究,包括桁架、太阳能电池板等。Tembo<sup>®</sup>EMC为美国CTD公司开发的弹性记忆复合材料(Elastic memory composite, EMC),为了验证该材料的应用前景,CTD公司开发了一种形状记忆铰链,并研究了截面形状、末端固定装置形状以及驱动方法等。结果表明,两个圆弧状的EMC层合板对接,通过两个45 $^\circ$ 角的端部夹具固定以及嵌入加热电阻进行焦耳加热驱动其展开是铰链的理想状态<sup>[40]</sup>,如图1所示。

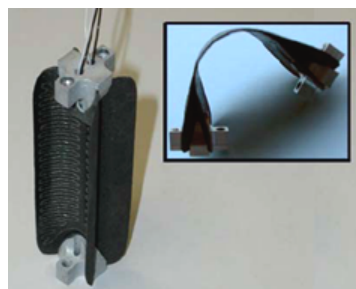


图1 Tembo<sup>®</sup> EMC铰链<sup>[40]</sup>

Fig. 1 Tembo<sup>®</sup> EMC hinge<sup>[40]</sup>

2016年,LI等<sup>[44]</sup>研发了一种基于碳纤维增强的SMPC太阳能阵列柔性基板原型(SMS-I),如图2(a)所示。SMS-I由一颗实验卫星带到地球同步轨道进行展开性能测试和长期反辐照观测。该结构的初始形状为平板状,发射之前对其进行折叠以减小空间占比,其基体材料为环氧基SMP, $T_g$ 为85.4  $^\circ\text{C}$ 。发射13 d后该结构在太阳辐照的作用下逐渐回复到其初始形状,回复率接近100%。8个月后,SMPC仍旧保持平直形态,无明显裂缝,表现出了良好的长期抗辐照能力。SMS-I是中国开创性的关于SMPC的轨道实验,也是世界上第一个SMPC地球同步轨道实验。该结构的成功部署表明了SMPC自展开机构用于空间可展开结构的可行性。2019



年,LAN等<sup>[45]</sup>在没有使用传统的电火工品和电机/控制器的情况下,对SMPC可展开柔性太阳能电池板系统(SMPC-FSAS)进行了研究开发、地面测试和在轨验证。如图2(b)所示,SMPC-FSAS包括一对可卷曲、可变刚度的环氧SMPC管状结构,一对基于氰酸酯基SMPC的锁紧释放机构,中间为一块柔性太阳能电池板。由环氧基SMPC制备的可变刚度梁为整个结构的框架,同时作为柔性太阳能电池阵列的执行器。由氰酸酯SMPC制备的锁紧释放机构,具有高锁紧刚度,可承受50g重

力加速度和10mm的大解锁位移。2020年1月5日,SMPC-FSAS在地球同步轨道上成功解锁和部署,一对基于环氧树脂的SMPC变刚度管,与柔性太阳能电池阵列相配合,缓慢展开,最终在加热的情况下60s内其形状回复率接近100%。该结构是世界首个基于SMPC的柔性太阳能阵列系统在轨展示,将促进下一代释放机构和空间可展开结构的研究,如具有低冲击和可重复使用的新型释放机构和超大空间可展开太阳能阵列。

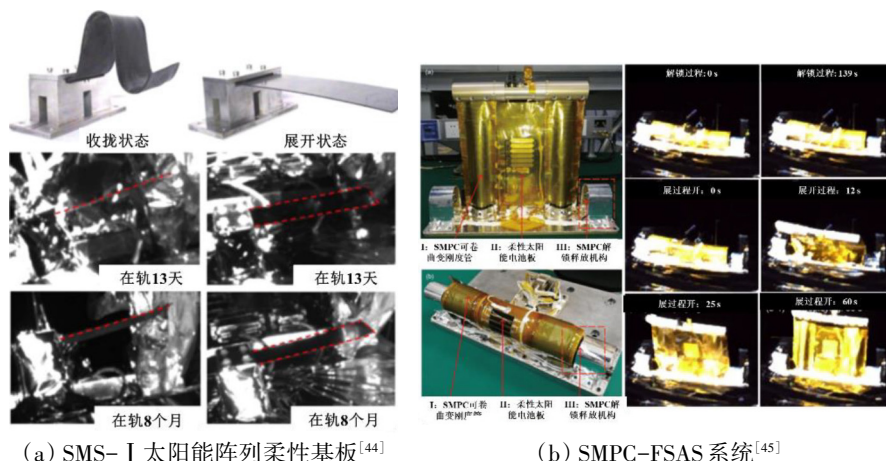


图2 柔性太阳能电池板系统  
Fig. 2 Flexible solar panel system

基于SPMC的智能铰链具有自锁、部署可控、冲击小等优点,可实现地面高刚度锁定,入轨时主动驱动展开,集“解锁、驱动、锁定”三种功能于一身。目前,仍有许多研究人员专注于开发SMPC铰链以及基于SMPC铰链的空间可展开结构。有些目前虽未进行空间验证,但它们的应用前景非常广阔。LIU等<sup>[46]</sup>开发了一种基于SMPC铰链的太阳能电池板原型(SMS-III),装配在一颗试验卫星上。SMS-III已通过机械振动测试、热真空测试和展开测试等所有的地面功能验证。如图3(a)所示,在该电池板的两侧分别装配有弯曲90°的铰链和弯曲180°的铰链各两个,每块电池板的质量为2.5kg。通过氦气球悬挂法抵消结构的重力,先后对弯曲90°的铰链和弯曲180°的铰链进行了失重条件下的展开实验。通过电热膜进行加热驱动,该结构依次展开,验证了该结构的空间可展开性能。LI等<sup>[47]</sup>研制了一种在顶部加端部载荷的空间可展开桁架结构,如图3(b)所示。该结构的三级可伸长套筒作为桁架的主体框架,相邻的套筒之间采用以120°圆心角环套筒呈圆周分布的SMPC柔性铰链连接。套筒中心采用特殊的锁紧释放装置固定收缩状态下的构型,桁架的顶端装载有1.3kg的载荷。铰链使用碳纤维增强氰酸酯基SMPC制备,在航天器发射和上升阶段,SMPC铰链被折叠成U

形。当航天器到达指定位置时,首先通过加热使锁紧释放装置解锁,使SMPC铰链温度升高至195℃以上,该结构将会在铰链的驱动下回复到其工作状态。振动实验结果表明,该结构顶部载荷为1.3kg时,该桁架可承受8g的正弦扫频振动,加速度实验结果表明,该桁架在三个正交方向上均能承受10g的加速度,通过1600g的冲击实验表明该桁架具有良好的抗冲击性能。

LIU等<sup>[48]</sup>提出了一种碳纤维增强的环氧基SMPC一体化铰链设计方案,并研制了一种新型可展开结构。该铰链由一个完整的SMPC管制备而成,在结构的弯曲区域将其切割成两个长度为100mm、圆弧角度为120°的弧形对称曲板,实现了SMPC铰链的一体化设计。与一般可展开机构相比,新型可展开机构具有更高的可靠性和更好的展开性能,能够在60s内从180°展开到0°,并且展开后其刚度和强度更高,其展开过程如图4所示。

## 2.2 锁紧释放机构

传统的基于火工品的解锁释放装置被广泛用于与运载火箭分离和太阳能电池板的部署,但是该分离技术通常伴随着高冲击和高污染的特点<sup>[49-50]</sup>。随后,SMA被用作卫星、航天器、航天飞机和空间站的解锁装置<sup>[51]</sup>。但是基于SMA的解锁装置的缺陷仍不



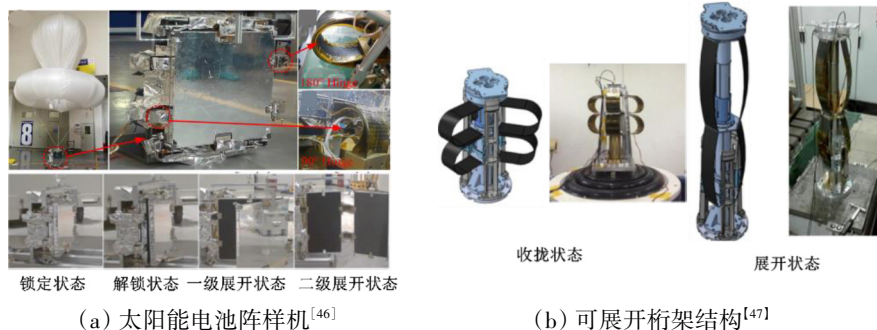


图3 基于SMPC铰链的可展开结构  
Fig. 3 Deployable structure based on SMPC hinge

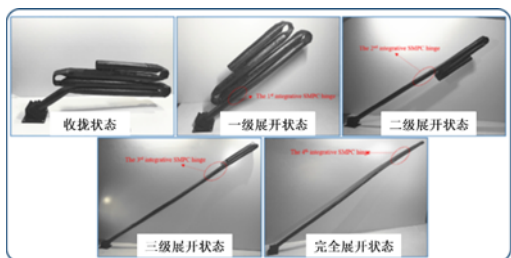


图4 基于SMPC的一体化铰链可展开桁架

Fig. 4 Integrated hinged deployable truss based on SMPC<sup>[48]</sup>  
可忽视,并且往往设计都比较复杂、价格昂贵,这极大的限制了其应用。KEITH等<sup>[52]</sup>提出了一种由交叉纤维制成的基于SMPC的热驱动解锁释放机构。该装置在降低质量、结构复杂性和成本方面表现出了巨大的潜力,但是其解锁效果并不理想。2015年,WEI等<sup>[53]</sup>提出了一种基于SMPC的新型智能八角形、

莲花形和竹子形的解锁释放装置,集功能、结构于一体,解锁方便。其中,智能八角形装置采用扭转变形作为其部署机制,通过将内筒和外筒以 $22.5^\circ$ 的扭转角将二者耦合在一起[图5(a)]。如图5(b)所示,莲花形解锁释放装置由不同直径的内筒和外筒组成,在两个筒的顶端切割成8个长度为13.5 mm的弧形可变形扣。将内筒和外筒的扣分别向不同的方向弯曲,便获得了该结构在锁定时的构型。如图5(c)所示,基于竹子形的解锁释放装置同样由内筒和外筒组成,利用特殊的装置将内筒和外筒的顶端调整成具有明显直径差的构型,并组装到一起。这三种结构分别利用的扭转变形、弯曲变形和收缩变形作为锁紧和释放的机制,通过电加热均可以在30 s内完成其解锁过程。但是由于该结构的锁紧机制限制,仅仅适用于承载不超过1 kN的场合。

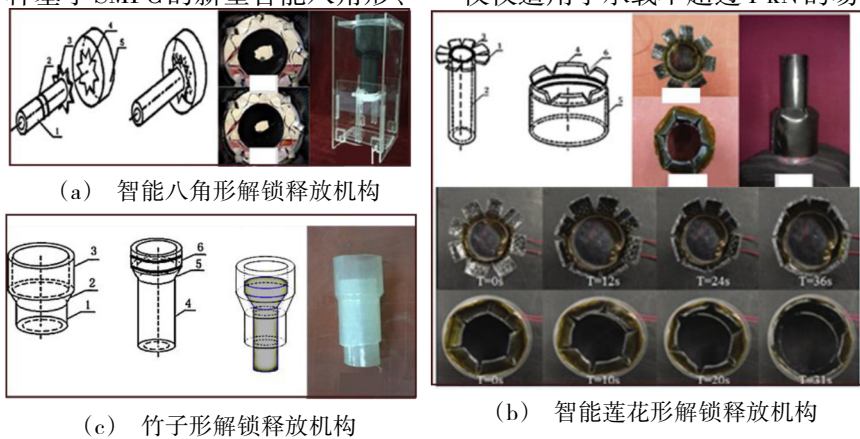


图5 基于SMP的解锁释放机构

Fig. 5 Releasing device based on SMP<sup>[53]</sup>

为了提高解锁释放机构的承载能力,冷等<sup>[54]</sup>提出了一种基于纤维缠绕技术的高承载压缩型解锁释放机构,如图6(a)所示。该机构同样由内筒和外筒构成,通过在该机构上面配置压痕,调节压痕的数量和尺寸便可以调节其承载力。经过实验验证,该结构的承载力可高达10 kN。ZHAO等<sup>[55]</sup>通过对该结构进行改进,设计了一种“沙漏型”低冲击锁紧释放装置,其结构示意图如图6(b)所示。该结构的内芯采

用金属制备而成,外筒为SMP或者SMPC。锁定时,将外套筒按照内芯上的凹陷进行压缩;分离时,对外部套筒的凹陷部位进行局部加热即可。同样,该解锁释放机构的锁紧力可以通过调节压痕的数量和深度来调控。结合丝网印刷技术,ZHANG等<sup>[56]</sup>开发了一种超轻的钩形解锁释放装置,用于解锁和固定一个小立方体卫星上的太阳能阵列。该解锁释放装置采用氨纶纤维增强的环氧基SMPC制备而成,通过丝

网印刷技术将电阻嵌入到构件内部,赋予了其更好的柔韧性,该结构连同外部电路总质量为6 g。在立方体卫星样机上对该结构的性能进行了实验,验证了该释放装置的可行性、锁定性能和可重复使用性。在3 V电压的驱动下,该结构用时25 s展开,并且该解锁释放结构在20个循环周期内性能稳定,如图6(c)所示。

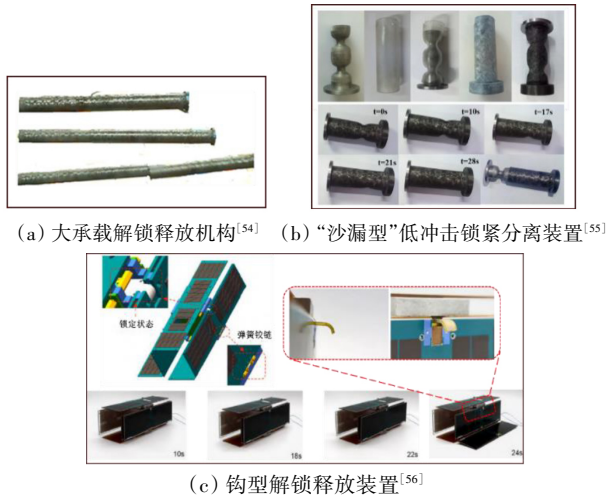


图6 不同样式的解锁释放装置

Fig. 6 Different styles of unlock releasing devices

### 3 可变形飞行器

可变形飞行器的概念来源于鸟儿在空中自由飞行的过程中可以根据气流和飞行目的改变翅膀的形状。例如:当鹰寻找猎物时,它的翅膀是完全展开的,但是一旦它发现猎物,它的翅膀会卷曲到身体上,迅速俯冲向猎物<sup>[57]</sup>。然而,传统飞机在一次飞行中只能执行单一任务,如用于攻击任务的F-17,或用于长途运输任务的波音747<sup>[58]</sup>。基于任务需求的不确定性,未来飞机应该拥有一些技术来改变机翼几

何构型来提高飞机的飞行性能。例如,飞机在执行巡航任务时,其机翼是平的,一旦飞机遇到某种特殊情况,机翼可以通过折叠以提高飞行速度,如图7(a)所示。Lockheed Martin公司<sup>[59]</sup>提出了一种Z形可变翼飞行器的概念,并通过地面和风洞测试验证了无人飞行器飞行性能。然而,翼型变化时,可变形蒙皮的设计也面临着一定的挑战,不仅需要较高的强度以抵抗气动载荷,又需要保证光滑的气动表面。美国CRG公司(Cornerstone Research Group)<sup>[60]</sup>提出了基于SMPC的无缝蒙皮的制造技术,即在连接部位使用SMP材料,如图7(b)所示,机翼蒙皮可以基于铰链的收拢或展开的状态而变形。在高温下,SMPC材料处于橡胶弹性状态,无缝蒙皮容易折叠而不损伤,当再次加热温度时,形状可以回复到其初始形状。

YU等<sup>[61]</sup>人提出了一种由SMP/SMPC组成的变形翼的概念,并将碳纤维增强的SMPC蒙皮的部署过程与SMA线增强的SMPC和弹性钢片增强的SMPC的部署过程进行了比较。结果表明,SMA线和弹性钢片增强的SMPC蒙皮比碳纤维增强的SMPC具有更高的回复速度。此外,YIN等<sup>[62]</sup>提出了变弧度机翼的概念,并进行了相关的实验来测量变形机理,选用布拉格光栅测量机翼的挠度,如图7(c)所示。考虑到SMPC在高/低温下具有可变的力学性能,CHEN等<sup>[63-64]</sup>制备了碳纤维增强的变刚度苯乙烯基SMPC管,并嵌入柔性硅橡胶蒙皮中。实验结果表明,变刚度SMPC管对变形蒙皮变形有显著影响:随着时间的增加,挠度逐渐增大。此外,GARCIA等<sup>[65]</sup>对无人机变形的概念、设计、技术和发展状况进行了很好的总结,特别对各种技术的优缺点进行了详细的阐述。

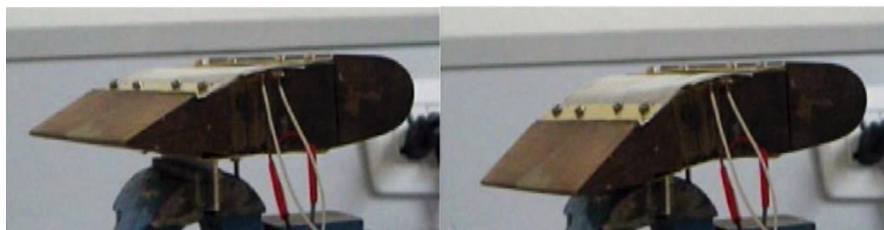
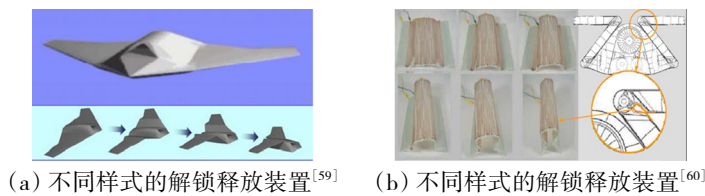


图7 可变翼和可变形蒙皮

Fig. 7 The morphing wing and deformable skin

宫晓博<sup>[66]</sup>研究了一种基于SMPC变刚度波纹板的可变弯度机翼。该机翼由柔性表皮、变刚度波纹板、主动变形蜂窝结构以及充气单元构成,如图8(a)

所示,其中变刚度波纹板采用碳纤维毡增强的环氧基SMPC制备。该可变弯度机翼的原理样机如图8(b)所示,在气压的作用下,该机翼中的主动变形蜂



窝构型发生变化,从而导致整个机翼的后缘发生偏转,弯度发生变化。利用SMPC的变刚度性质,通过电加热使其升高到 $T_g$ 以上,在气压的作用下,机翼后缘的变形量可达53 mm,表现出了较强的变形能力。变形翼尖技术可以通过改变固定翼的构型调节阻力、燃油消耗和起飞和降落的距离。SUN等<sup>[67]</sup>提出了一种基于主动充气蜂窝和SMPC蒙皮的变形翼尖

概念。两种材料和结构子系统的结合允许翼尖在气动肌肉的驱动下展开,并且气动蒙皮也能够承受一定的气动载荷。该系统中的蜂窝结构由充气管通过体积膨胀来驱动,并且该蜂窝结构为凹角构型,具有负泊松比效应。气动纤维作为一种可以提供轴向推力的轻量化、低成本和高效的驱动器,还可以抵抗弯矩,图8(c)为可变形翼尖的变形过程。

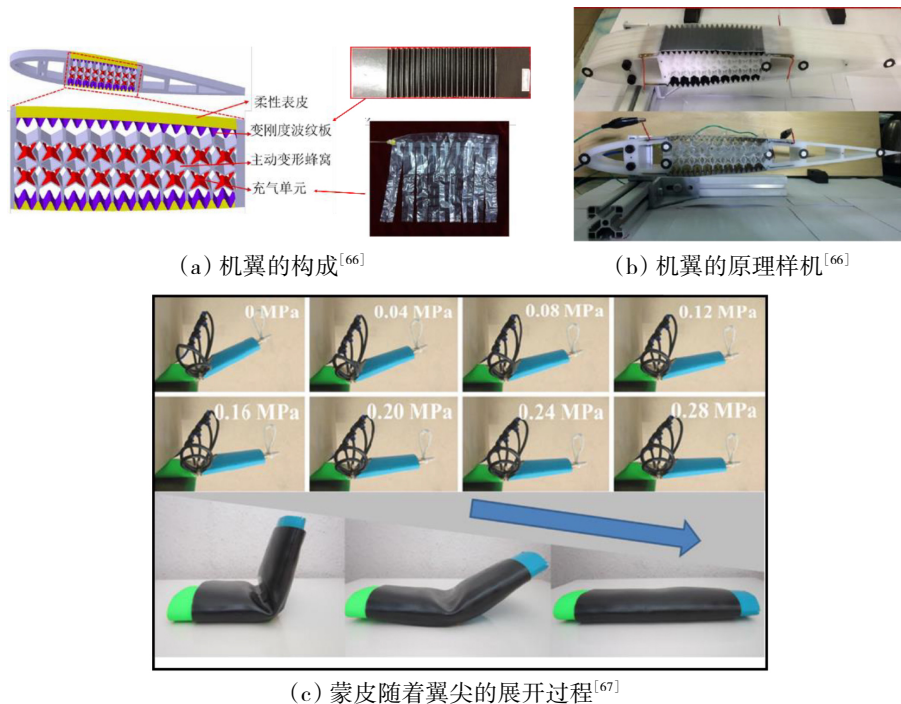


图8 基于SMPC变刚度波纹板的可变弯度机翼

Fig. 8 Variable camber wing based on SMPC variable stiffness corrugated plate

#### 4 4D打印可变形结构

随着航天事业的发展,对探索越来越难以进入的空间环境以及对更多、更复杂的有效载荷的需求,使得对可展开系统的需求激增。尽管为了确保稳健,对机械化装载和展开过程进行了大量研究,但随着系统越来越复杂,系统构成材料的固有行为成为实现大规模可展开系统部署的可行手段。而通过使用4D打印技术,可以在可编程物质内嵌入和分布传感、控制和驱动元件,展示出了一种制造一体化的可行方法。

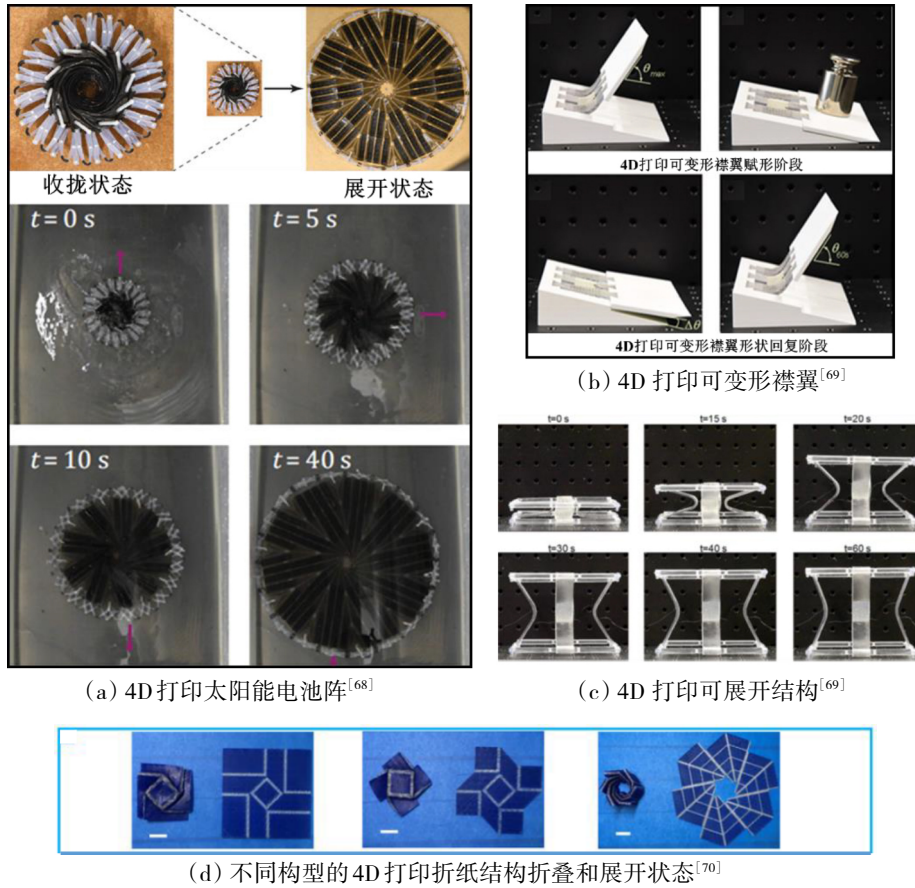
CHEN等<sup>[68]</sup>提出了一种基于SMP的可展开太阳能电池板阵列概念,该结构采用商用打印机Stratasys Connex3 Objet500,利用FLX9895( $T_g$ 为35℃)和RGD835( $T_g$ 为65℃)两种材料制备而成。该自展开系统具有一个完整的旋转周期,可通过对该结构提前进行编程,在相应的环境刺激下完成其自展开功能,其可重构功能和结构稳定性利用组成材料的物理特性以及楔形单胞的结构来实现。该结构可以折叠成圆盘状,也可以折叠成圆锥状,其面积变化超过10倍。在加热的环境中,该机构经过40 s逐渐展开,

首先是系统整体的旋转,之后呈放射性膨胀展开,如图9(a)所示。QI等<sup>[69]</sup>提出了一种基于SMP的可展开铰链,并利用该铰链设计了可变形襟翼和可展开结构。同样,该结构通过商用打印机Stratasys Connex3 Objet500,利用与机器配套的专用材料进行制备。该结构将活动铰链与弹性柔性铰链结合在一起,在编程过程中储存弹性应变能,然后在驱动时释放弹性应变能,从而有效提高结构的承载能力,并且在该结构中嵌入了电阻丝来实现局部焦耳加热。通过多材料喷墨4D打印技术提供了柔性铰链的机械性能的高度可定制性,显著提高了设计灵活性。图9(b)和(c)分别展示了可变形襟翼和可变形结构在电驱动下的形状回复过程,通过电阻加热的方式可以有效地调控材料内部的温度分布,并将其控制在一定的范围。为了提高折纸结构的刚度和回复力,XIN等<sup>[70]</sup>利用4D打印技术和形状记忆打印丝采用熔融打印的方式,设计并制备了以拉胀力学超材料为夹芯结构的4D打印SMP折纸结构,如图9(d)所示。研究了夹芯结构的面内拉伸、三点弯曲和形状记忆性能,表征了折纸结构的快速响应、大收纳比和高回复



率等性能,该结构在空间可展开天线中具有广阔的应用前景。4D打印虽然在空间可展开结构方面应用前景巨大,但是限于材料及打印设备的打印尺寸等,

目前该技术尚处于研发阶段。然而,关于4D打印可变形结构的研究目前更多的是一个概念性的设计,其材料的性能是否满足航天航空的需求尚需验证。



(d) 不同构型的4D打印折纸结构折叠和展开状态<sup>[70]</sup>

图9 4D打印可展开结构

Fig. 9 Deployable structures fabricated by 4D printing

## 5 展望

介绍了SMP和SMPC在航天航空领域的应用现状和发展前景。在外部刺激下模量可改变是SMP和SMPC最显著的特点,利用该性质SMPC铰链/臂架可以折叠、收拢,并利用其形状记忆特性实现结构的形状固定和形状回复。基于智能材料的可展开结构具有设计简单、工艺性好以及 $T_g$ 可调的优势,预计不久的将来在航天航空领域有多维度的发展。然而,SMPC在航天航空领域的应用还面临一些挑战,如具有较高的 $T_g$ 并能够适应空间恶劣环境的SMP和SMPC的材料类型以及用于4D打印的抗空间辐照的材料非常有限。因此,开发具有能够抗空间辐照、具有较高 $T_g$ 的SMP和SMPC以及适合4D打印的材料是未来需要发展的方向之一。基于SMP和SMPC的结构大大降低了机械结构的复杂性,目前所报道的空间可展开结构包括太阳能阵列、太阳帆和天线等,其构型相对较小。而4D打印技术在集传感、控制和驱动于一体的空间可展开结构的制备上展现出了一定的优势。因此,通过对4D打印设备进行合理的改

进,并结合折纸等概念,制备具有更大的收纳比的、更大型的结构也是未来可以探索的方向之一。

## 参考文献

- [1] BEHL M, LENDLEIN A. Shape-memory polymers[J]. *Materials Today*, 2007(10):20-28.
- [2] LENG J S, LAN X, LIU Y J, et al. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications [J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56: 1077-1135.
- [3] LIU T Z, ZHOU T Y, YAO Y T, et al. Stimulus methods of multi-functional shape memory polymer nanocomposites: a review [J]. *Composites Part A*, 2017, 100: 20-30.
- [4] HUANG W M, DING Z, WANG C C. Shape memory materials[J]. *Materials Today*, 2010, 13: 54-61.
- [5] XIE T. Tunable polymer multi-shape memory effect [J]. *Nature*, 2010, 464:267-270.
- [6] MEIORIN C, ACTIS D, MONTORO F, et al. Magnetic remote activation of shape recovery in nanocomposites based on tung oil and styrene [J]. *Physica Status Solidi A*. 2018, 215(24):1800311.
- [7] ZHAO W, HUANG Z P, LIU L W, et al. Porous bone 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第4期

tissue scaffold concept based on shape memory PLA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 205:108563.

[8] ZHAO W, LIU L W, LENG J S, et al. Personalized 4D printing of bioinspired tracheal scaffold concept based on magnetic stimulated shape memory composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 184: 107866

[9] KUENSTLER A, HAYWARD R. Light-induced shape morphing of thin films[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2019, 40: 70–86.

[10] LI S, JIN X, SHAO Y, et al. Gold nanoparticle/reduced graphene oxide hybrids for fast light-actuated shape memory polymers with enhanced photothermal conversion and mechanical stiffness[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 116:302–310.

[11] URBINA L, ALONSO A, SARALEGI A, et al. Hybrid and biocompatible cellulose/polyurethane nanocomposites with water-activated shape memory properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 216(15): 86–96.

[12] LV H B, YU K, SUN S H, et al. Mechanical and shape memory behavior of shape memory polymer composites with hybrid fillers[J]. *Polymer International*, 2010, 59:766–771.

[13] WEI Z G, SANDSTROM R, MIYAZAKI S. Shape memory materials and hybrid composites for smart systems—part II shape memory hybrid composites [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33:3763–3783.

[14] KOERNE H, PRICE G, PEARCE N, et al. Remotely actuated polymer nanocomposites—stress-recovery of carbon-nanotube-filled thermoplastic elastomers [J]. *Nature Materials*, 2004(3): 115–120.

[15] LENG J S, LAN X, LIU Y J, et al. Electroactive thermoset shape memory polymer nanocomposite filled with nanocarbon powders[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(7): 074003–074008.

[16] QI X, XIU H, WEI Y, et al. Enhanced shape memory property of polylactide/thermoplastic poly (ether) urethane composites via carbon black self-networking induced co-continuous structure[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 139:8–16.

[17] NI Q Q, ZHANG C S, FU Y, et al. Shape memory effect and mechanical properties of carbon nanotube/shape memory polymer nanocomposites [J]. *Composite Structures*, 2007, 81(2): 176–184.

[18] DU F P, YE E Z, YANG W. Electroactive shape memory polymer based on optimized multiwalled carbon nanotubes/polyvinyl alcohol nanocomposites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 68:170–175.

[19] LI X, WANG L, ZHANG Z, et al. Electroactive high-temperature shape memory polymers with high recovery stress induced by ground carbon fibers[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2019, 220(17): 1900164–1900168.

[20] BUCKLEY P R, MCKINLEY G H, WILSON T S, et al. Inductively heated shape memory polymer for the magnetic 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第4期

actuation of medical devices [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53: 2075–2083.

[21] CAO F, JANA S. Nanoclay-tethered shape memory polyurethane nanocomposites[J]. *Polymer*, 2007, 48:3790–3800.

[22] OHKI T, NI Q Q, OHSAKO N. Mechanical and shape memory behavior of composites with shape memory polymer [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(9): 1065–1073.

[23] YONGKUN W, GUANMING Z, YUSHENG T, et al. Short glass fiber reinforced radiation crosslinked shape memory SBS/LLDPE blends [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(17):40691.

[24] FEJOS M, ROMHANY G, KARGER J. Shape memory characteristics of woven glass fibre fabric reinforced epoxy composite in flexure [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 31(22): 1532–1537.

[25] LIU Y, GALL K, DUNN M L, et al. Thermomechanics of shape memory polymer nanocomposites [J]. *Mechanics and Materials*, 2004, 36(10): 929–940.

[26] GALL K, DUNN M L, LIU Y, et al. Internal stress storage in shape memory polymer nanocomposites [J]. *Applied Physics Letter*, 2004, 85: 290.

[27] LIKITAPORN C, MORA P, TIPTIPAKORN S, et al. Recovery stress enhancement in shape memory composites from silicon carbide whisker-filled benzoxazine epoxy polymer alloy [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 29(3): 388–396.

[28] SMP Technologies Inc. Intelligent material able to adjust itself accordingly to ensure the highest level of comfort & affinity with human body[EB/OL]. <http://www2.smptechno.com/en/tech/pdf/%5B2018%5DSMP%20Tech%20E-Catalogue.pdf>

[29] HUANG W, YANG B, ZHAO Y, et al. Thermomisture responsive polyurethane shape-memory polymer and composites: a review [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20: 3367–3381.

[30] SCHMIDT C, CHOWDHURY A M, NEUKING K, et al. Mechanical behavior of shape memory polymers by IWE method: application to Tecoflex® [J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2011, 24: 853–860.

[31] EVERHART M C, NICKERSON D M, HREHA R D. High temperature reusable shape memory polymer mandrels[C]. *Proc. SPIE 6171, Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 61710K*, 2006.

[32] MCCLUNG A J, TANDON G P, BAUR J W. Strain rate- and temperature-dependent tensile properties of an epoxy-based, thermosetting, shape memory polymer (Veriflex-E) [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2012, 16:205–221.

[33] GALL K, DUNN M L, LIU Y, et al. Shape memory polymer nanocomposites[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50:5115–5126.

- [34] ARZBERGER S C, MUNSHI N A, LAKE M S, et al. Elastic memory composite technology for thin lightweight space- and ground-based deployable mirrors [C]. Optical Science and Technology, SPIE's 48<sup>th</sup> Annual Meeting, 2003, San Diego, California, United States. Proc. SPIE, 5179:143-154.
- [35] CADOGAN D, SCARBOROUGH S, LIN J, et al. Shape memory composite development for use in Gossamer space inflatable structure [C]. 43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, 2002.
- [36] SANTO L, QUADRINI F, SQUEO E A, et al. Behavior of shape memory epoxy foams in microgravity: experimental results of STS-134 mission [J]. Microgravity Science and Technology, 2012, 24:287-296.
- [37] LENG J S, WU X L, LIU Y J. Effect of a linear monomer on the thermomechanical properties of epoxy shape-memory polymer [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18:095031
- [38] XIE F, HUANG L, LIU Y J, et al. Modified shape memory cyanate polymers with a wide range of high glass transition temperatures [C]. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2012, San Diego, California, United States. Proc. SPIE 8342.
- [39] XIAO X, KONG D, QIU X, et al. Shape-memory polymers with adjustable high glass transition temperatures [J]. Macromolecules, 2015, 48:3582-3589.
- [40] ARZBERGER S C, MICHAEL T, MARK L, et al. Elastic memory composites (EMC) for deployable industrial and commercial applications [C]. Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. Proc. SPIE, 2005, 5762:35-47.
- [41] XIE F, LIU L W, GONG X B, et al. Effects of accelerated aging on thermal, mechanical and shape memory properties of cyanate-based shape memory polymer: I vacuum ultraviolet radiation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 138: 91-97.
- [42] GAO H, LAN X, LIU L W, et al. Study on performances of colorless and transparent shape memory polyimide film in space thermal cycling, atomic oxygen and ultraviolet irradiation environments [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26:095001
- [43] TAN Q, LI F F, LIU L W, et al. Effects of atomic oxygen on epoxy-based shape memory polymer in low earth orbit [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29:1081-1087.
- [44] LI F F, LIU L W, LAN X, et al. Ground and geostationary orbital qualification of asunlight-stimulated substrate based on shape memory polymer composite [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28:075023.
- [45] LAN X, LIU L W, ZHANG F H, et al. World's first spaceflight on-orbit demonstration of a flexible solar array system based on shape memory polymer composites [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(8):1436-1451.
- [46] LIU Z X, LAN X, BIAN W F, et al. Design, material properties and performances of a smart hinge based on shape memory polymer composites [J]. Composites Part B, 2020, 193:108056.
- [47] LI F F, LIU L W, DU L Z, et al. Mechanical analysis of a tip-loaded deployable truss based on shape memory polymer composite [J]. Composite Structures, 2020, 242: 112196.
- [48] LIU T Z, LIU L W, YU M, et al. Integrative hinge based on shape memory polymer composites: material, design, properties and application [J]. Composite Structures, 2018, 206: 164-176.
- [49] LUCY M, HARDY R, KIST E, et al. "Report on alternative devices to pyrotechnics on spacecraft [C]. 10<sup>th</sup> Annual AIAAUSU Conf. on Small Satellites, 1996.
- [50] HUNG W M. On the selection of shape memory alloys for actuators [J]. Materials Design, 2002, 23:11-19.
- [51] HERBAGE E. Comparison of shape memory metals and polymers [J]. Advanced Engineering Materials, 2006 (8) : 101-106.
- [52] KEITH R, GALL S, MARK L. Development of a shockless thermally actuated release nut using elastic memory composite material [C]. Presented at the 44<sup>th</sup> Structural Dynamics, and Materials Conference, Norfolk, Virginia. Paper No. AIAA, 2003, 2003-1582.
- [53] WEI H Q, LIU L W, ZHANG Z C, et al. Design and analysis of smart release devices based on shape memory polymer composites [J]. Composite Structures, 2015, 133: 642-651.
- [54] 刘立武, 赵伟, 兰鑫, 等. 智能软聚合物及其航空航天领域应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 1-17.
- LIU L W, ZHAO W, LAN X, et al. Soft intelligent material and its applications in aerospace [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5):1-17.
- [55] ZHAO H X, LAN X, LIU L W, et al. Design and analysis of shockless smart releasing device based on shape memory polymer composites [J]. Composite Structures, 2019, 223:110958.
- [56] ZHANG D, LIU L W, LENG J S, et al. Ultra-light release device integrated with screen-printed heaters for CubeSat's deployable solar arrays [J]. Composite Structures, 2020, 232:111561.
- [57] GROSS K E. Mechanical characterization of shape memory polymers to assess candidacy as morphing aircraft skin [D]. University of Pittsburgh, 2006.
- [58] RAUSCHER S G. Testing and analysis of shape memory polymers for morphing aircraft skin application [D]. University of Pittsburgh, 2006.
- [59] LOVE M H, ZINK P S, STROUD R L, et al. Demonstration of morphing technology through ground and wind tunnel tests [C]. 48<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural dynamics, and Materials Conference, Honolulu,



Hawaii, April, 23–26, 2007.

[60] BYE DR, MCCLURE PD. Design of a morphing vehicle [C]. 48<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, April, 321–36, 2007.

[61] YU K, YIN W L, SUN S H, et al. Design and analysis of morphing wing based on SMP composite [C]. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2009, San Diego, California, United States. Proc. SPIE 2009, 7292 72900S.

[62] YIN W L, FU T, LIU J C, et al. Structural shape sensing for variable camber wing using FBG sensors [C]. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2009, San Diego, California, United States. Proc. SPIE 2009, 7292 72921H.

[63] CHEN Y J, SUN J, LIU Y J, et al. Variable stiffness property study on shape memory polymer composite tube [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21:094021.

[64] CHEN S B, CHEN Y J, FENG N, et al. Experiment and analysis of morphing skin embedded with shape memory polymer composite tube [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(16):2052–2059.

[65] GOMEZ J C, GARCIA E. Morphing unmanned aerial

vehicles[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20:103001.

[66] 宫晓博. 基于变刚度蒙皮和零泊松比蜂窝的变弯度机翼结构研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.

GONG X B. Research on variable camber morphing wing structure based on variable stiffness morphing skin and zero Poisson's ratio cellular structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[67] SUN J, DU L Z, SCARPA F et al. Morphing wingtip structure based on active inflatable honeycomb and shape memory polymer composite skin: A conceptual work [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111:106541.

[68] CHEN T, BILAL O R, LANG R, et al. Autonomous deployment of a solar panel using elastic origami and distributed shape-memory-polymer actuators[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(6): 064069.

[69] AKBARI S, SAKHAEI A H, KOWSARI K, et al. Enhanced multimaterial 4D printing with active hinges [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27:065027.

[70] XIN X Z, LIU L W, LIU Y J, et al. Origami-inspired self-deployment 4D printed honeycomb sandwich structure with large shape transformation [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29: 065015.